

Studi Perbaikan Stabilitas Tegangan Sistem Jawa-Madura-Bali (Jamali) dengan Pemasangan SVC Setelah Masuknya Pembangkit 1000 MW Paiton

Heru Pujo Prayitno, Ontoseno Penangsang, Ni Ketut Aryani

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111, Indonesia

e-mail: ketut.aryani@gmail.com, ontosenop@ee.its.ac.id, herupujo80@gmail.com

Abstrak - Sebagian besar pemadaman sistem tenaga listrik yang terjadi disebabkan oleh tekanan yang tinggi pada sistem daya dengan besarnya permintaan daya aktif dan reaktif dan kondisi tegangan yang rendah. Ketika tegangan pada sistem tenaga bus rendah, kerugian juga akan meningkat. Sehingga diperlukan pengembangan teknik khusus untuk meningkatkan tegangan dan menghilangkan ketidakstabilan tegangan dalam sistem tenaga. *Flexible Alternating Current Transmission Systems* (FACTS) sangat intensif untuk menjaga stabilitas tegangan pada jalur transmisi untuk memanipulasi aliran daya. Performa sistem tenaga dan stabilitas sistem tenaga dapat ditingkatkan dengan menggunakan perangkat FACTS, salah satunya dengan *Static VAR Compensator* (SVC). Pada tugas akhir ini bertujuan untuk memperbaiki stabilitas tegangan terutama memperbaiki profil tegangan terhadap penambahan suatu beban P dan Q pada rencana pengembangan sistem kelistrikan Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500kV tahun 2021 dengan pemasangan SVC pada bus yang sensitif. Analisis stabilitas tegangan dapat dilakukan dengan metode kestabilan kurva PV. Hasil perbandingan kurva PV sebelum dan sesudah pemasangan SVC dapat menunjukkan adanya perbaikan perbedaan kestabilan tegangan. Perbaikan tegangan dengan menggunakan SVC dapat menjaga tegangan untuk tetap berada pada batas nilai kestabilan tegangan.

Kata kunci : Kestabilan tegangan, *Static VAR Compensator* (SVC), Kurva PV, Sistem Kelistrikan Jamali 500kV-2021.

I. PENDAHULUAN

SISTEM tenaga listrik harus bekerja secara optimal dalam melayani beban yang bersifat fluktuatif dan jenis beban yang beragam. Karakteristik beban sangat mempengaruhi kapasitas (*capacity*) dan kemampuan (*capability*) sistem dalam menyalurkan daya. Konfigurasi jaringan yang luas dan berkembang juga menyebabkan pengoperasian sistem tenaga listrik menjadi lebih rumit dan sulit dikontrol. Salah satu masalah yang timbul adalah terjadinya gangguan yang mengakibatkan ketidakstabilan tegangan pada sistem.

Sebagian besar pemadaman sistem tenaga listrik yang terjadi disebabkan oleh tekanan yang tinggi pada sistem daya dengan besarnya permintaan daya aktif dan reaktif dan kondisi tegangan yang rendah. Ketika tegangan pada sistem tenaga bus rendah, kerugian juga akan meningkat. Sehingga diperlukan pengembangan teknik khusus untuk meningkatkan tegangan dan menghilangkan ketidakstabilan tegangan dalam sistem tenaga. *Flexible Alternating Current Transmission Systems*

(FACTS) sangat intensif untuk menjaga stabilitas tegangan pada jalur transmisi untuk memanipulasi aliran daya. FACTS bekerja secara fleksibel dan secara langsung dapat digunakan untuk transfer daya reaktif yang sangat membantu dalam pengoperasian jaringan listrik. Performa sistem tenaga dan stabilitas sistem tenaga dapat ditingkatkan dengan menggunakan perangkat FACTS [1], salah satunya dengan *Static VAR Compensator* (SVC) [2].

Peralatan FACTS merupakan peralatan elektronika daya yang dapat mengubah parameter seperti impedansi, tegangan dan sudut fasa. FACTS juga membantu untuk mengurangi arus berlebih pada jaringan, mengakibatkan peningkatan kemampuan beban, mengurangi kerugian sistem, meningkatkan stabilitas, dan mengurangi biaya produksi dengan mengatur aliran daya pada jaringan transmisi. Sehingga dapat mengontrol dengan baik stabilitas aliran daya statis dan aliran daya dinamis [3]. *Static Var Kompensator* (SVC) adalah salah satu perangkat yang paling efektif untuk meningkatkan stabilitas tegangan dan meningkatkan kemampuan transfer daya jaringan transmisi, untuk ini SVC harus terpasang dengan benar pada sistem dengan parameter yang sesuai. Beberapa faktor dipertimbangkan untuk pengoptimalan instalasi dan pengoptimalan parameter SVC, dengan tujuan meningkatkan margin stabilitas tegangan sehingga diperoleh peningkatan kapasitas transmisi listrik [4].

Tujuan dari penelitian ini adalah dengan menggunakan analisis dari kurva PV didapatkan batas *steady state* serta karakteristik dari sebuah sistem, sehingga dapat mengetahui bus yang sensitif terhadap penambahan beban. Dari bus tersebut dipasang SVC yang nantinya akan memperbaiki profil tegangan yang terjadi.

II. TEORI PENUNJANG

A. Studi Aliran Daya

Sasaran utama dari semua analisa aliran daya adalah menentukan besar dan sudut fasa tegangan pada setiap bus, dengan diketahuinya tegangan maka daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) dapat dihitung. Jika P dan Q pada dua buah bus diketahui maka aliran daya dengan jelas dapat diketahui, serta rugi-rugi daya saluran penghubung dapat diketahui. Pada tiap-tiap bus terdiri dari 4 besaran, yaitu: daya aktif P, daya reaktif Q, harga skalar tegangan $|V|$, dan sudut fasa tegangan θ .

Ada 3 macam bus dalam hal ini setiap bus mempunyai empat besaran dengan dua besaran diantaranya diketahui yakni:

- Bus referensi (*slack bus*). Adalah bus yang selalu mempunyai besaran skalar ($|V|$) dan sudut fasa (θ) yang tetap dan telah diberikan sebelumnya.
- Bus beban (bus PQ), daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) diketahui.
- Bus generator (bus PV), besar tegangan ($|V|$) dan daya aktif (P) telah ditentukan.

B. Metode Newton Raphson

Persamaan umum dari arus yang menuju bus adalah:

$$I_i = \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \quad (1)$$

Secara umum, persamaan load flow dapat ditulis sebagai berikut:

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (2)$$

Dalam perhitungan daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) dapat diturunkan dari persamaan:

$$P = VI \cos \theta, \text{ dimana } I = V \cdot Y \quad (3)$$

dengan substitusi persamaan maka didapatkan:

$$P = V_1 V_2 Y \cos(\delta_1 - \delta_2 - \theta) \quad (4)$$

Jika persamaan tersebut diaplikasikan pada analisa banyak mesin/ multimesin, maka persamaan yang didapat:

$$P_i = V_i^2 G_{ii} + \sum_{i,j}^n Y_{ij} V_i V_j \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (5)$$

Pada persamaan Q juga dapat diturunkan dari persamaan:

$$Q = VI \sin \theta \quad (6)$$

sehingga,

$$Q = V_1 V_2 Y \sin(\delta_1 - \delta_2 - \theta) \quad (7)$$

Jika pada banyak mesin/ multimesin, maka persamaan yang didapat:

$$Q_i = V_i^2 B_{ii} - \sum_{i,j}^n Y_{ij} V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (8)$$

Kemudian, setelah daya dan tegangan tiap bus diketahui, maka akan ditentukan matrik Jacobian untuk iterasi selanjutnya. Matrik Jacobian sendiri terdiri dari komponen H, komponen N, komponen J, dan komponen L.

$$\text{Jacobian matrik} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \quad (9)$$

Sehingga, untuk mencari aliran daya setiap bus dapat ditulis persamaan dari load sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \frac{\Delta|V|}{|V|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (10)$$

Selanjutnya dari perkalian matrik Jacobian diatas, akan didapat nilai dari $\Delta\theta_i$ dan $\Delta|V_i|$ yang digunakan sebagai *update* sudut dan magnitude tegangan tiap bus.

$$\theta_i^{(k+1)} = \theta_i^{(k)} + \Delta\theta_i \quad (11)$$

$$|V_i|^{(k+1)} = |V_i|^{(k)} + \Delta|V_i| \quad (12)$$

C. Static VAR Compensator (SVC)

Static Var Compensator (SVC) adalah komponen FACTS dengan hubungan paralel, yang fungsi utamanya untuk mengatur tegangan pada bus tertentu dengan cara mengontrol besaran reaktansi ekuivalen. Dari sudut pandang operasional, SVC bekerja seperti reaktans variabel shunt, yang bisa

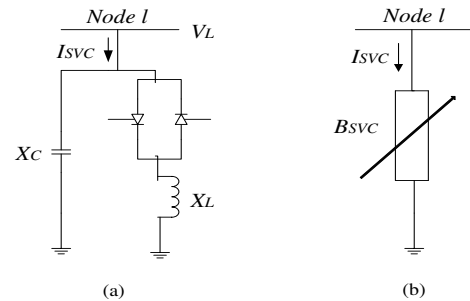
menghasilkan atau menyerap daya reaktif untuk mengatur besarnya tegangan pada titik sambungan ke jaringan AC. Kontrol sudut penyalan thyristor memiliki kecepatan respon yang hampir seketika. SVC digunakan secara luas untuk menyalurkan daya reaktif dan menyediakan *support* regulasi tegangan dengan cepat. Selain itu SVC juga dipakai untuk meningkatkan batas stabilitas sistem dan mengurangi osilasi daya. Secara umum ada dua konfigurasi SVC, yaitu:

a). Model firing angle SVC (Gambar 1(a))

Pemodelan SVC berupa reaktansi ekuivalen X_{SVC} , yang merupakan dari perubahan sudut penyalan α , terdiri dari kombinasi paralel admitansi ekuivalen thyristor-controlled reactor (TCR) dan reaktansi kapasitif tetap.

b). Model total susceptance SVC

SVC dilihat sebagai sebuah reaktansi yang dapat diatur melalui perubahan susceptansi B_{SVC} , yang melambangkan nilai susceptansi SVC total yang diperlukan untuk mempertahankan besar tegangan bus pada nilai tertentu, seperti ditunjukkan pada Gambar 1(b).



Gambar 1. Konfigurasi SVC

Dengan mengacu pada gambar 1(b), arus yang dialirkan oleh SVC adalah

$$I_{SVC} = jB_{SVC} V_l \quad (14)$$

dan daya reaktif yang dibangkitkan oleh SVC, yang juga merupakan daya reaktif yang diinjeksikan pada bus l, adalah

$$Q_{SVC} = Q_l = -V_l^2 B_{SVC} \quad (15)$$

D. Sensitivitas Tegangan

Sensitivitas tegangan adalah keadaan dimana tegangan pada bus jika dilakukan penambahan beban, atau dengan keadaan normal dilakukan aliran daya, keadaan beban pada bus beban tidak mengalami penurunan. Penurunan tegangan pada bus beban diakibatkan dengan adanya suatu penambahan beban secara kontinyu. Jika penambahan beban pada bus dan sumber listrik tidak dilakukan penambahan sumber, maka drop tegangan akan terjadi pada bus tersebut.

Metode Newton Raphson digunakan untuk menganalisa sensitivitas tegangan pada masing-masing bus pada jaringan. Adapun untuk mengetahui besar selisih tegangan (ΔV) pada masing-masing bus sehingga dapat dilihat perubahan tegangan pada bus. Persamaan drop tegangan pada bus adalah:

$$\Delta|V_i| = |V_i^k| - |V_i|^{(k+1)} \quad (13)$$

| No. | Dari Bus | Ke Bus | R(pu) | X(pu) | B(pu) |
|-----|----------|--------|---------|---------|---------|
| 1 | 1 | 2 | 0,00007 | 0,00072 | 0,26116 |
| 2 | 1 | 5 | 0,00038 | 0,00362 | 1,2968 |
| 3 | 3 | 4 | 0,00006 | 0,00056 | 0,2016 |
| 4 | 3 | 1 | 0,00006 | 0,00056 | 0,2016 |
| 5 | 4 | 5 | 0,00035 | 0,00338 | 1,21001 |
| 6 | 5 | 8 | 0,0004 | 0,00449 | 1,62058 |
| 7 | 6 | 5 | 0,00018 | 0,00175 | 0,62502 |
| 8 | 6 | 7 | 0,00008 | 0,00084 | 0,30368 |
| 9 | 7 | 14 | 0,0002 | 0,00225 | 0,80992 |
| 10 | 7 | 17 | 0,00004 | 0,00042 | 0,15184 |
| 11 | 7 | 8 | 0,00015 | 0,00169 | 0,60943 |
| 12 | 9 | 8 | 0,00003 | 0,00034 | 0,12147 |
| 13 | 10 | 11 | 0,0001 | 0,00112 | 0,40492 |
| 14 | 10 | 9 | 0,00015 | 0,00169 | 0,6074 |
| 15 | 11 | 12 | 0,00015 | 0,00169 | 0,6074 |
| 16 | 13 | 19 | 0,0001 | 0,00101 | 0,36088 |
| 17 | 13 | 12 | 0,0001 | 0,00118 | 0,42516 |
| 18 | 14 | 13 | 0,00012 | 0,00113 | 0,40321 |
| 19 | 15 | 16 | 0,00108 | 0,01224 | 4,47444 |
| 20 | 16 | 17 | 0,00003 | 0,00034 | 0,12147 |
| 21 | 16 | 20 | 0,00077 | 0,00861 | 3,12475 |
| 22 | 16 | 2 | 0,00035 | 0,00397 | 1,43403 |
| 23 | 17 | 18 | 0,00008 | 0,00079 | 0,28225 |
| 24 | 18 | 33 | 0,00041 | 0,00459 | 1,65912 |
| 25 | 18 | 19 | 0,00012 | 0,00113 | 0,40321 |
| 26 | 18 | 16 | 0,0003 | 0,00337 | 1,21511 |
| 27 | 20 | 34 | 0,00004 | 0,00045 | 0,16196 |
| 28 | 20 | 21 | 0,0006 | 0,00672 | 2,43272 |
| 29 | 21 | 22 | 0,0001 | 0,00112 | 0,4049 |
| 30 | 22 | 23 | 0,0004 | 0,00449 | 1,62058 |
| 31 | 23 | 24 | 0,00101 | 0,01137 | 4,14634 |
| 32 | 24 | 43 | 0,00009 | 0,00086 | 0,30845 |
| 33 | 24 | 25 | 0,001 | 0,01128 | 4,11357 |
| 34 | 25 | 26 | 0,00054 | 0,00606 | 2,19091 |
| 35 | 26 | 27 | 0,00051 | 0,00566 | 2,04672 |
| 36 | 28 | 12 | 0,0001 | 0,00112 | 0,40492 |
| 37 | 29 | 30 | 0,0001 | 0,00112 | 0,40492 |
| 38 | 29 | 12 | 0,00017 | 0,00159 | 0,56855 |
| 39 | 31 | 32 | 0,00022 | 0,00214 | 0,76618 |
| 40 | 31 | 30 | 0,00004 | 0,00045 | 0,16196 |
| 41 | 33 | 34 | 0,00019 | 0,00211 | 0,76131 |
| 42 | 33 | 32 | 0,00015 | 0,00142 | 0,50806 |
| 43 | 34 | 36 | 0,0007 | 0,0067 | 2,41036 |
| 44 | 34 | 35 | 0,00029 | 0,00281 | 1,00824 |
| 45 | 35 | 36 | 0,0004 | 0,00383 | 1,37148 |
| 46 | 36 | 40 | 0,00079 | 0,00894 | 3,24708 |
| 47 | 37 | 36 | 0,00023 | 0,00225 | 0,80652 |
| 48 | 38 | 40 | 0,0002 | 0,00225 | 0,80992 |

| | | | | | |
|----|----|----|---------|---------|---------|
| 49 | 39 | 40 | 0,00146 | 0,01424 | 5,19319 |
| 50 | 39 | 31 | 0,00052 | 0,00577 | 2,08733 |
| 51 | 40 | 42 | 0,00032 | 0,00353 | 1,27592 |
| 52 | 41 | 42 | 0,00067 | 0,00754 | 2,73374 |
| 53 | 41 | 40 | 0,00127 | 0,01442 | 5,29767 |
| 54 | 42 | 44 | 0,0012 | 0,0116 | 4,2044 |
| 55 | 43 | 42 | 0,0003 | 0,00337 | 1,21511 |
| 56 | 45 | 48 | 0,00012 | 0,00129 | 0,46566 |
| 57 | 45 | 46 | 0,00046 | 0,00518 | 1,87215 |
| 58 | 45 | 44 | 0,00028 | 0,00268 | 0,95982 |
| 59 | 46 | 47 | 0,00079 | 0,00894 | 3,24708 |
| 60 | 46 | 27 | 0,00044 | 0,00493 | 1,78084 |
| 61 | 48 | 49 | 0,00008 | 0,00073 | 0,26208 |
| 62 | 50 | 27 | 0,00218 | 0,02556 | 9,82732 |

Data pembangkitan dan data bus ditunjukkan pada tabel 2. Dimana ($MVA_B = 100 \text{ MVA}$) dan ($V_B = 500 \text{ kV}$).

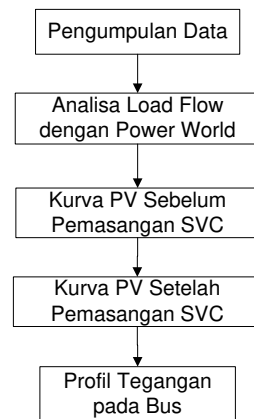
Tabel 2.

Data pembangkitan sistem interkoneksi 500 kV Jamali

| No | Bus | Load | | Generator | | Qmax | Qmin | Qinj |
|-----|------|--------|--------|-----------|--------|--------|---------|--------|
| Bus | Code | MW | MVAR | MW | MVAR | MVAR | MVAR | MVAR |
| 1 | 1 | 219 | 106,1 | 2071,9 | 1494,8 | 2189,1 | -964,07 | 0 |
| 2 | 0 | 475,3 | 230,2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 2 | 0 | 0 | 1552,5 | -176,9 | 1069,1 | -334,2 | 0 |
| 4 | 2 | 0 | 0 | 1600 | 383,25 | 1239,5 | -387,6 | 0 |
| 5 | 2 | 2185,2 | 1058,3 | 1197 | 1239,5 | 1239,5 | -387,5 | 0 |
| 6 | 0 | 900 | 435,9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 814 | 394,2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 551 | 266,9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 1950,3 | 944,6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 2 | 900 | 435,9 | 1398 | 609,4 | 609,4 | -348,7 | 0 |
| 11 | 2 | 593 | 287,2 | 1830 | 1780 | 1780 | -451,4 | 0 |
| 12 | 2 | 1500,3 | 726,6 | 2385 | 1642,3 | 1642,3 | -426,4 | 0 |
| 13 | 0 | 1126 | 545,3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 14 | 0 | 1650,6 | 799,4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 2 | 0 | 0 | 2084 | 190,45 | 1859,2 | -581,2 | 0 |
| 16 | 0 | 2700 | 1307,7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 17 | 0 | 792 | 383,6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 18 | 0 | 522,2 | 253 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 19 | 0 | 900 | 435,9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | 0 | 638 | 309 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 21 | 0 | 480,8 | 232,9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 22 | 2 | 0 | 0 | 810 | 184,69 | 557,77 | -174,36 | 0 |
| 23 | 2 | 1800 | 871,8 | 2675 | 797,86 | 2162,2 | -675,92 | 0 |
| 24 | 0 | 1050,3 | 508,7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 148,34 |
| 25 | 0 | 1071,4 | 518,9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 178,93 |
| 26 | 0 | 900 | 435,9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 27 | 2 | 704,7 | 341,3 | 4500 | 220,6 | 3046,4 | -1465,2 | 96 |
| 28 | 2 | 0 | 0 | 1360 | 825,41 | 991,6 | -310 | 0 |
| 29 | 0 | 900 | 435,9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 30 | 0 | 746,8 | 361,7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 31 | 0 | 900 | 435,9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 32 | 2 | 597 | 289,1 | 907,2 | 347,35 | 347,35 | -320 | 0 |
| 33 | 2 | 0 | 0 | 1566 | 821,13 | 821,13 | -337,09 | 0 |
| 34 | 0 | 477 | 231 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| | | | | | | | | |
|----|---|-------|-------|--------|--------|--------|---------|---|
| 35 | 0 | 653,6 | 316,6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 36 | 0 | 450 | 218 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 37 | 2 | 0 | 0 | 1854 | 133,6 | 1276,7 | -321,6 | 0 |
| 38 | 2 | 0 | 0 | 1710 | 55,29 | 1177,5 | -368,08 | 0 |
| 39 | 2 | 0 | 0 | 2364 | 8,21 | 1642,3 | -513,38 | 0 |
| 40 | 0 | 900 | 435,9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 41 | 2 | 450 | 218 | 3600 | 69,11 | 2875,6 | -511,4 | 0 |
| 42 | 0 | 784,3 | 379,9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 43 | 0 | 900 | 435,9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 44 | 0 | 642,4 | 311,1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 45 | 0 | 1045 | 506,1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 46 | 2 | 619,8 | 300,2 | 1076,4 | 845,6 | 845,6 | -166,7 | 0 |
| 47 | 0 | 1350 | 653,8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 48 | 2 | 1260 | 610,2 | 2736 | 1523,8 | 1884,2 | -432,8 | 0 |
| 49 | 0 | 900 | 435,9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 50 | 0 | 900 | 435,9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

B. Metodologi Penelitian



Gambar 3. Diagram alir algoritma genetika

Berdasarkan gambar 3 di atas maka metodologi simulasi yang digunakan dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Dengan menggunakan data-data yang dari sistem kelistrikan Jamali 500 kV. Data-data meliputi data pembangkitan, data beban, dan data saluran dari masing-masing bus. Kemudian dilakukan studi aliran daya (*load flow analysis*) dengan PowerWorld 18 simulator saat keadaan awal.
2. Analisa sistem jaringan untuk mengetahui perubahan tegangan menggunakan persamaan aliran daya.
3. Dari hasil running program didapatkan bus yang mengalami drop tegangan yang cukup tinggi, jika dilakukan penambahan beban P dan Q.
4. Plot kurva PV pada saat sebelum pemasangan SVC pada bus sensitif.
5. Pemasangan SVC pada bus sensitif untuk perbaikan tegangan pada bus sensitif akan drop tegangan.
6. Plot kurva PV kembali untuk menunjukkan tegangan setelah pemasangan SVC pada bus sensitif. Profil tegangan pada bus drop tegangan akan diperbaiki, sehingga drop tegangan tidak terlalu besar.

IV. SIMULASI DAN ANALISIS

A. Simulasi dan Analisis pada Sistem Jaringan

Simulasi sistem tenaga listrik pada tugas akhir adalah menggunakan PowerWorld 18. Metode Newton Raphson digunakan untuk perhitungan aliran daya. Hasil running program load flow tegangan dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 3.

Hasil simulasi load flow tegangan

| No Bus | V (pu) | θ | Load | | Generator | |
|--------|---------|----------|--------|--------|-----------|---------|
| | | | MW | MVAR | MW | MVAR |
| 1 | 1 | 0 | 219 | 106,1 | 2071,95 | 1494,84 |
| 2 | 0,99236 | -0,75 | 475,3 | 230,2 | 0 | 0 |
| 3 | 1 | 0,47 | 0 | 0 | 1552,5 | -176,9 |
| 4 | 1 | 0,43 | 0 | 0 | 1600 | 383,25 |
| 5 | 0,98069 | -2,87 | 2185,2 | 1058,3 | 1197 | 1239,5 |
| 6 | 0,9641 | -4,27 | 900 | 435,9 | 0 | 0 |
| 7 | 0,96056 | -4,51 | 814 | 394,2 | 0 | 0 |
| 8 | 0,96515 | -4,72 | 551 | 266,9 | 0 | 0 |
| 9 | 0,96566 | -4,8 | 1950,3 | 944,6 | 0 | 0 |
| 10 | 0,9875 | -3,26 | 900 | 435,9 | 1398 | 609,4 |
| 11 | 0,99931 | -2,58 | 593 | 287,2 | 1830 | 1780 |
| 12 | 0,98925 | -2,63 | 1500,3 | 726,6 | 2385 | 1642,3 |
| 13 | 0,96656 | -4,37 | 1126 | 545,3 | 0 | 0 |
| 14 | 0,95736 | -5,15 | 1650,6 | 799,4 | 0 | 0 |
| 15 | 1 | 11,17 | 0 | 0 | 2084 | 190,45 |
| 16 | 0,96 | -3,96 | 2700 | 1307,7 | 0 | 0 |
| 17 | 0,95995 | -4,26 | 792 | 383,6 | 0 | 0 |
| 18 | 0,96229 | -4,09 | 522,2 | 253 | 0 | 0 |
| 19 | 0,9618 | -4,52 | 900 | 435,9 | 0 | 0 |
| 20 | 0,98321 | -0,28 | 638 | 309 | 0 | 0 |
| 21 | 0,9961 | 2,03 | 480,8 | 232,9 | 0 | 0 |
| 22 | 1 | 2,73 | 0 | 0 | 810 | 184,69 |
| 23 | 1 | 3,53 | 1800 | 871,8 | 2675 | 797,86 |
| 24 | 0,96899 | -0,11 | 1050,3 | 508,7 | 0 | 0 |
| 25 | 0,9629 | -3,21 | 1071,4 | 518,9 | 0 | 0 |
| 26 | 0,97017 | -0,91 | 900 | 435,9 | 0 | 0 |
| 27 | 1 | 4,1 | 704,7 | 341,3 | 4500 | 220,6 |
| 28 | 1 | -1,8 | 0 | 0 | 1360 | 825,41 |
| 29 | 0,97842 | -2,32 | 900 | 435,9 | 0 | 0 |
| 30 | 0,97621 | -1,51 | 746,8 | 361,7 | 0 | 0 |
| 31 | 0,97724 | -1 | 900 | 435,9 | 0 | 0 |
| 32 | 0,98573 | -0,38 | 597 | 289,1 | 907,2 | 347,35 |
| 33 | 0,9892 | -0,22 | 0 | 0 | 1566 | 821,13 |
| 34 | 0,98413 | -0,08 | 477 | 231 | 0 | 0 |
| 35 | 0,98281 | 0,74 | 653,6 | 316,6 | 0 | 0 |
| 36 | 0,99261 | 3,27 | 450 | 218 | 0 | 0 |
| 37 | 1 | 5,66 | 0 | 0 | 1854 | 133,6 |
| 38 | 1 | 8,62 | 0 | 0 | 1710 | 55,29 |
| 39 | 1 | 6,77 | 0 | 0 | 2364 | 8,21 |
| 40 | 0,99515 | 6,42 | 900 | 435,9 | 0 | 0 |
| 41 | 1 | 13,95 | 450 | 218 | 3600 | 69,11 |
| 42 | 0,98129 | 4,12 | 784,3 | 379,9 | 0 | 0 |
| 43 | 0,968 | 0,4 | 900 | 435,9 | 0 | 0 |
| 44 | 0,98706 | -0,79 | 642,4 | 311,1 | 0 | 0 |
| 45 | 0,99265 | -0,92 | 1045 | 506,1 | 0 | 0 |
| 46 | 0,99712 | 0,31 | 619,8 | 300,2 | 1076,4 | 845,6 |

| | | | | | | |
|----|---------|-------|------|-------|------|---------|
| 47 | 0,92808 | -6,93 | 1350 | 653,8 | 0 | 0 |
| 48 | 1 | -0,52 | 1260 | 610,2 | 2736 | 1523,83 |
| 49 | 0,99619 | -0,88 | 900 | 435,9 | 0 | 0 |
| 50 | 0,95218 | -9,91 | 900 | 435,9 | 0 | 0 |

Dari hasil perhitungan aliran daya pada tabel 3 dapat dilihat bus yang memiliki tegangan abnormal yaitu bus yang memiliki tegangan dibawah 0,95 pu ($< 95\%$). Dimana bus tersebut adalah bus 47 dengan tegangan 0,92808 pu.

B. Analisis Sensitifitas Tegangan

Metode Newton Raphson digunakan untuk menganalisa sensitifitas tegangan pada masing-masing bus pada jaringan 500 kV Jamali. Untuk mengetahui besar selisih tegangan (ΔV) pada masing-masing bus maka dilakukan iterasi sebanyak 100 kali pada bus berbeda sehingga dapat dilihat perubahan tegangan pada bus. Hasil running perhitungan dengan PowerWorld dapat dilihat pada tabel 4.

Tabel 4.

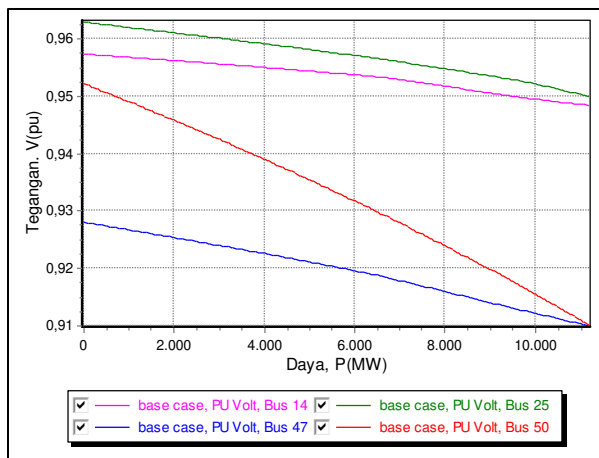
Hasil tegangan bus setelah iterasi ke-100

| Bus No. | V_{i1} (pu) | V_{i100} (pu) | ΔV (pu) | $V(kV)$ |
|---------|---------------|-----------------|-----------------|---------|
| 1 | 1 | 1 | 0 | 500 |
| 2 | 0,99236 | 0,99007 | 0,00229 | 495,036 |
| 3 | 1 | 1 | 0 | 500 |
| 4 | 1 | 1 | 0 | 500 |
| 5 | 0,98069 | 0,97451 | 0,00618 | 487,256 |
| 6 | 0,9641 | 0,95533 | 0,00877 | 477,663 |
| 7 | 0,96056 | 0,95133 | 0,00923 | 475,666 |
| 8 | 0,96515 | 0,95661 | 0,00854 | 478,304 |
| 9 | 0,96566 | 0,95723 | 0,00843 | 478,613 |
| 10 | 0,9875 | 0,98087 | 0,00663 | 490,433 |
| 11 | 0,99931 | 0,99351 | 0,0058 | 496,755 |
| 12 | 0,98925 | 0,98336 | 0,00589 | 491,68 |
| 13 | 0,96656 | 0,95851 | 0,00805 | 479,254 |
| 14 | 0,95736 | 0,94844 | 0,00892 | 474,221 |
| 15 | 1 | 1 | 0 | 500 |
| 16 | 0,96 | 0,95006 | 0,00994 | 475,031 |
| 17 | 0,95995 | 0,95043 | 0,00952 | 475,216 |
| 18 | 0,96229 | 0,95336 | 0,00893 | 476,679 |
| 19 | 0,9618 | 0,95314 | 0,00866 | 476,568 |
| 20 | 0,98321 | 0,97902 | 0,00419 | 489,512 |
| 21 | 0,9961 | 0,99547 | 0,00063 | 497,733 |
| 22 | 1 | 1 | 0 | 500 |
| 23 | 1 | 1 | 0 | 500 |
| 24 | 0,96899 | 0,95436 | 0,01463 | 477,179 |
| 25 | 0,9629 | 0,94996 | 0,01294 | 474,98 |
| 26 | 0,97017 | 0,96277 | 0,0074 | 481,384 |
| 27 | 1 | 1 | 0 | 500 |
| 28 | 1 | 0,99622 | 0,00378 | 498,111 |
| 29 | 0,97842 | 0,97271 | 0,00571 | 486,356 |
| 30 | 0,97621 | 0,971 | 0,00521 | 485,5 |
| 31 | 0,97724 | 0,9723 | 0,00494 | 486,151 |
| 32 | 0,98573 | 0,98066 | 0,00507 | 490,328 |
| 33 | 0,9892 | 0,98415 | 0,00505 | 492,074 |
| 34 | 0,98413 | 0,97997 | 0,00416 | 489,986 |
| 35 | 0,98281 | 0,9792 | 0,00361 | 489,6 |

| | | | | |
|----|---------|---------|---------|---------|
| 36 | 0,99261 | 0,99036 | 0,00225 | 495,182 |
| 37 | 1 | 1 | 0 | 500 |
| 38 | 1 | 1 | 0 | 500 |
| 39 | 1 | 1 | 0 | 500 |
| 40 | 0,99515 | 0,9902 | 0,00495 | 495,102 |
| 41 | 1 | 1 | 0 | 500 |
| 42 | 0,98129 | 0,96887 | 0,01242 | 484,436 |
| 43 | 0,968 | 0,95331 | 0,01469 | 476,654 |
| 44 | 0,98706 | 0,97922 | 0,00784 | 489,612 |
| 45 | 0,99265 | 0,98914 | 0,00351 | 494,569 |
| 46 | 0,99712 | 0,99016 | 0,00696 | 495,081 |
| 47 | 0,92808 | 0,91002 | 0,01806 | 455,009 |
| 48 | 1 | 1 | 0 | 500 |
| 49 | 0,99619 | 0,99598 | 0,00021 | 497,988 |
| 50 | 0,95218 | 0,91027 | 0,04191 | 455,135 |

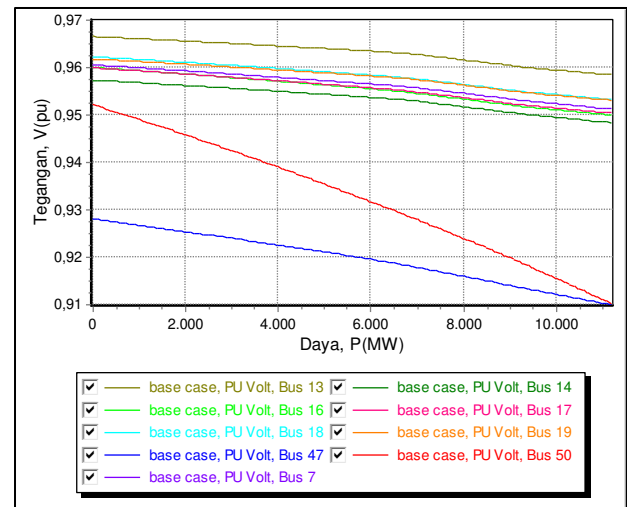
C. Kurva PV

Kurva PV diperoleh dengan melakukan penambahan beban secara kontinyu pada suatu bus hingga mencapai titik kritis dari bus tersebut. Karakteristik kurva PV tegangan berbanding terbalik dengan perubahan beban, tegangan semakin turun akibat adanya penambahan beban. Gambar 4 menunjukkan hasil plot kurva PV pada bus *under voltage* saat kondisi normal yang akan dijadikan kandidat untuk diperbaiki yaitu pada bus 14, 25, 47, dan 50.



Gambar 4. Kurva PV bus 14, 25, 47, dan 50 kondisi normal

Perbaikan tegangan dilakukan dengan penambahan SVC dan dipilih pada bus yang memiliki sensitivitas tinggi. Hal tersebut dapat dilakukan dengan melihat sensitivitas dari masing-masing bus. Sensitivitas dari masing-masing bus dapat diketahui dengan melihat besar perubahan tegangan terhadap perubahan daya beban sistem. Setelah didapatkan kurva PV dari masing-masing bus maka ditentukan kurva PV untuk bus yang memiliki sensitivitas paling tinggi. Hasil *plotting* kurva PV pada bus yang memiliki sensitivitas paling tinggi dari semua bus dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 5. Kurva PV bus sensitif

Pada percobaan dapat diketahui tingkat sensitivitas dari masing-masing bus. Dimana diambil sembilan bus dengan nilai sensitivitas paling tinggi. Berdasarkan karakteristik kurva PV dapat diketahui bus yang memiliki sensitivitas paling tinggi ke paling rendah adalah bus 50, 47, 16, 14, 17, 19, 7, 13, dan 18.

D. Pemasangan SVC

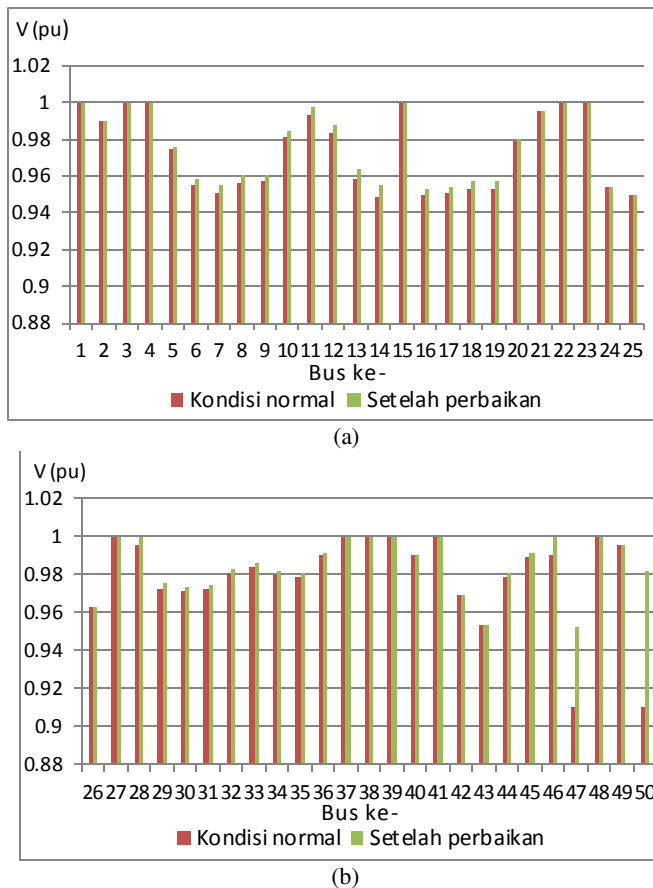
Untuk perbaikan tegangan pada bus yang mengalami *under voltage*, penempatan SVC diimplementasikan berdasarkan hasil dari karakteristik kurva PV dari bus sensitif dan dipilih pada bus yang paling sensitif. Maka pemilihan bus yang akan dipasang SVC dipilih dari 3 bus paling sensitif yaitu pada bus 50, 47, dan 14.

Ukuran SVC yang dipasang pada masing-masing bus diasumsikan maksimal adalah 300 Mvar. Setelah simulai dijalankan maka besar daya reaktif yang diinjeksikan pada masing-masing bus adalah:

- Bus 50 = 175,97 MVar
- Bus 47 = 288,45 MVar
- Bus 14 = 290,65 MVar

E. Analisis Stabilitas Tegangan Setelah Penambahan SVC

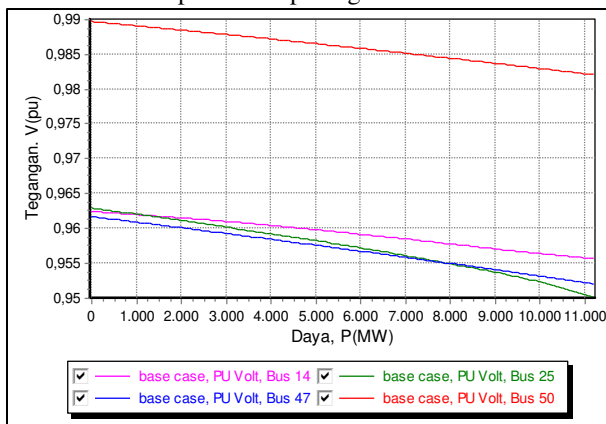
Dari hasil percobaan menunjukkan bahwa aliran daya setelah pemasangan SVC dapat memperbaiki jatuh tegangan pada bus yang sebelumnya mengalami *under voltage*. Gambar 6 menunjukkan profil tegangan saat kondisi normal dan perubahan tegangan setelah pemasangan SVC.



Gambar 6. Grafik profil tegangan bus sistem sebelum dan setelah perbaikan (a) bus no. 1-25, (b) bus no. 26-50

Akibat adanya penambahan SVC selain perbaikan profil tegangan juga dapat mengurangi rugi-rugi daya pada saluran. Rugi-rugi daya aktif yang pada saluran dapat tereduksi sebesar 1,68 %, dimana rugi-rugi awal yang semula bernilai 377,06 MW berkurang menjadi 370,72 MW.

Berikut hasil plot kurva PV setelah perbaikan dari bus *under voltage* (bus 14, 25, 47, dan 50) setelah diinjeksikan daya reaktif dari SVC dapat dilihat pada gambar 7.



Gambar 7. Kurva PV bus 14, 25, 47, dan 50 setelah perbaikan

Gambar 7 merupakan grafik kurva PV dari bus-bus yang mengalami *under voltage* yang menunjukkan adanya perubahan tegangan setelah pemasangan SVC, dimana tegangan pada bus meningkat dan berada pada batas kestabilan tegangan. Untuk mengetahui kestabilan tegangannya, beban dinaikkan secara berkala dari kondisi normal hingga mencapai batas maksimum penambahan beban atau kondisi kritis pada tiap-tiap bus beban yaitu sebesar 11208 MW. Sehingga dapat dilihat setelah dilakukan pemasangan SVC titik kritis dari masing-masing bus meningkat. Dimana nilai kritis dari masing-masing bus yaitu: bus 14 = 0,95562 pu, bus 25 = 0,95010 pu, bus 47 = 0,95198 pu, dan bus 50 = 0,98208 pu

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil yang didapatkan dari simulasi dan analisis pada tugas akhir ini, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Penambahan beban P dan Q terhadap sistem transmisi Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500kV dapat mengakibatkan penurunan tegangan yang relatif besar.
2. Kurva PV digunakan untuk menentukan tingkat stabilitas dari masing-masing bus, sehingga dapat dilihat sensitivitas dari masing-masing bus.
3. Perbaikan tegangan dengan pemasangan SVC pada bus sensitif memberikan hasil yang memuaskan dimana diperoleh tegangan sistem yang stabil.
4. Adanya pemasangan SVC dapat memperbaiki profil tegangan sehingga berada pada batas toleransi, adapun profil tegangan terendah sebelum pemasangan SVC berada pada bus 47 yaitu 0,91002 pu, sedangkan setelah perbaikan profil tegangan terendah berada pada bus 25 yaitu 0,9501 pu.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. N. G. Hingorani and L. Gyugyi, "Understanding FACTS-concepts and technology of flexible AC transmission systems," IEEE press, First Indian Edition, 2001.
- [2]. Khandani, S. Soleymani, B. Mozafari, "Optimal Placement of SVC To Improve Voltage Profile Using Hybrid Genetics Algorithm And Sequential Quadratic Programming", conference on electrical power distribution network (EPDC), 2011.
- [3]. Anju Gupta, P.R. Sharma, "Optimal Placement of FACTS Devices for Voltage Stability Using Line Indicator", IEEE, 2012.
- [4]. M. Karami, N. Mariun, "Determining optimal location of Static Var Compensator by means of genetic algorithm" IEEE, 2011.